



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND  
ELECTRICAL ENGINEERING -  
DEVICES AND SYSTEMS,  
MATERIALS AND TECHNOLOGIES  
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

## Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische  
Angelegenheiten  
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Susanne Jakob  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):  
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):  
Universitätsbibliothek Ilmenau  
[ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:  
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

A. Novitskiy, H. Schau, T. Nachtwey, U. Klemmer

# **Bewertung der Neutralleiterbelastung in NS-Netzen**

## **Versorgungsqualität**

### **1 Einführung in die Problematik**

Werden die drei Phasen des Drehstromsystems durch sinusförmige Ströme symmetrisch belastet, so fließt im Neutralleiter kein Strom. Drehstromsysteme werden deshalb so geplant, dass unsymmetrische Belastungen vermieden werden. Dies gilt auch für Niederspannungsnetze und ermöglicht die Verlegung des Neutralleiters mit einem kleineren Querschnitt als für die Leiter der drei Phasen. In NS-Netzen mit Belastungen, die dem Netz einen nichtsinusförmigen Strom entnehmen, kann trotz symmetrischer Belastung der drei Phasen ein Neutralleiterstrom fließen, der bei zu kleinem Neutralleiterquerschnitt zu thermischen Problemen führen kann.

Durch den vermehrten Einsatz von nichtlinearen und meist einphasigen Abnehmern in den Niederspannungsnetzen erhöhen sich die Strombelastungen der Neutralleiter drastisch. In [1] wird gezeigt, dass der Effektivwert des Neutralleiterstroms in einem modernen Büro mit typischen EDV-Geräte-Belastungen bis zu 1,73-mal größer als der Effektivwert der Außenleiterströme sein kann. Aus diesem Grund wird in manchen Ländern empfohlen, den Neutralleiter mit dem doppelten Querschnitt gegenüber den Außenleitern auszulegen oder einen separaten Neutralleiter für jede einzelne Phase zu verlegen [2]. Im Gegensatz dazu werden allerdings aber auch NS-Kabel mit verminderten Neutralleiterquerschnitten nach wie vor eingesetzt.

Nachfolgend wird über praktische Verfahren zur Ermittlung der zu erwartenden Neutralleiterströme auf der Grundlage der Charakteristika der Betriebszustände und der Parameter der Betriebsmittel von Niederspannungsnetzen sowie der Elektroenergiequalitätskenngrößen berichtet.

## 2 Theoretische Betrachtungen

### 2.1 Strom-Spannungs-Verhältnisse in einem NS- Drehstromsystem mit Neutralleiter

Den typischen Aufbau eines Niederspannungs-Drehstromnetzes zeigt Bild 1. Es handelt sich hierbei um ein einseitig gespeistes Strahlennetz, das in vielen Fällen in dieser Form oder auch als Teil eines Niederspannungsnetzes vorliegt. Charakteristisch für diese Niederspannungsnetze ist, dass die Einspeisung aus dem Mittelspannungsnetz in Transformatorstationen erfolgt. Die Niederspannungs-Belastungen werden entweder direkt an der NS-Sammelschiene der entsprechenden Transformatorstation angeschlossen oder über NS-Kabel bzw. Freileitungen gespeist, die die Anschlusspunkte der Belastungen mit der Transformatorstation verbinden. Die Neutralleiter der Leitungen werden mit dem Transformator-Sternpunkt direkt verbunden. Der Sternpunkt wird normalerweise geerdet. Transformatoren mit Bemessungsleistungen von 160 kVA und höher werden in der Regel in der Schaltgruppe Dyn5 ausgeführt. Bild 2 stellt das vereinfachte Ersatzschaltbild des NS-Strahlennetzes nach Bild 1 dar.

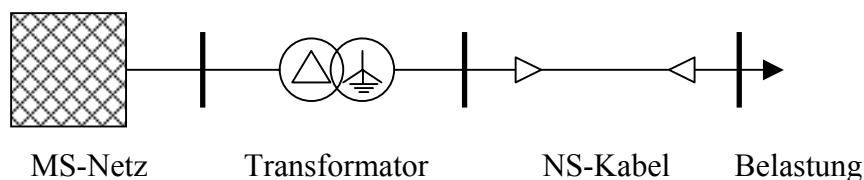


Bild 1: Typischer Aufbau eines NS-Strahlennetzes

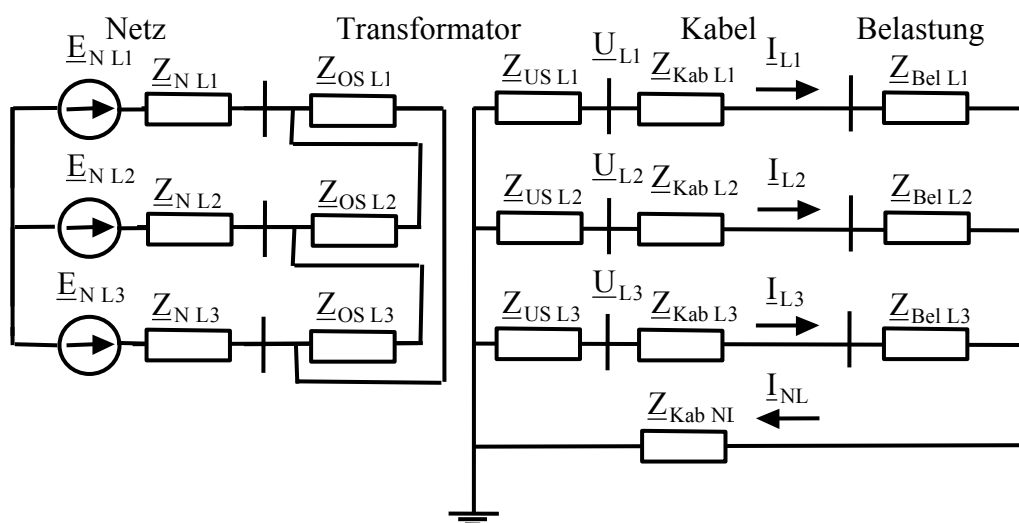


Bild 2: Ersatzschaltbild eines NS-Strahlennetzes

Zur theoretischen Ermittlung der Strom-Spannungs-Verhältnisse bei Belastungsunsymmetrie kann das Vierleiter- Drehstromsystem vereinfacht nach Bild 3 dargestellt werden:

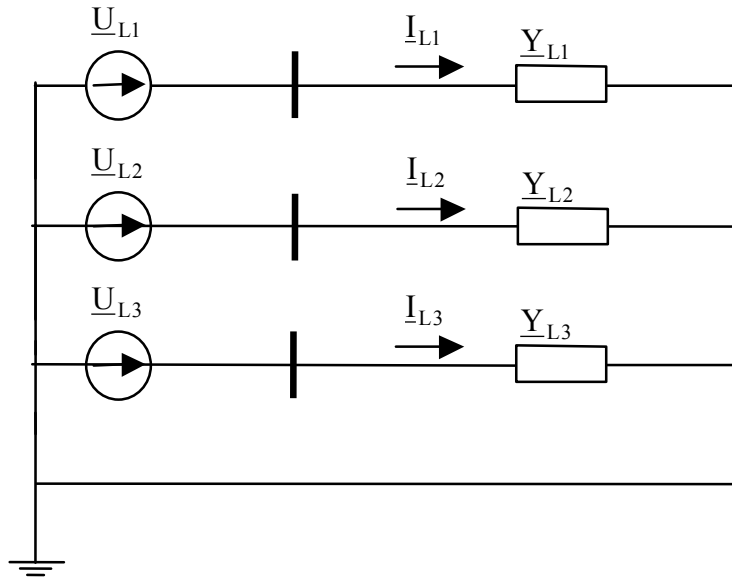


Bild 3: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines NS-Strahlennetzes

Das symmetrische Dreiphasen-Spannungssystem kann wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L1} &= U_{L1} \\ \underline{U}_{L2} &= U_{L1} \cdot \underline{a}^2 \\ \underline{U}_{L3} &= U_{L1} \cdot \underline{a}\end{aligned}\tag{1}$$

mit  $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ,  $\underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$

Die Leiterströme berechnen sich nach:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L1} &= U_{L1} \cdot \underline{Y}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} &= U_{L1} \cdot \underline{a}^2 \cdot \underline{Y}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} &= U_{L1} \cdot \underline{a} \cdot \underline{Y}_{L3}\end{aligned}\tag{2}$$

Daraus resultieren die symmetrischen Komponenten der Leiter-Ströme

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (\underline{Y}_{L1} + \underline{Y}_{L2} + \underline{Y}_{L3}) \\ \underline{I}_2 &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (\underline{Y}_{L1} + \underline{a} \cdot \underline{Y}_{L2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{Y}_{L3}) \\ \underline{I}_0 &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (\underline{Y}_{L1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{Y}_{L2} + \underline{a} \cdot \underline{Y}_{L3})\end{aligned}\tag{3}$$

Mit der konventionellen Darstellung einer komplexen Admittanz  $\underline{Y}$  als Summe der

Konduktanz (ohmscher Leitwert)  $G$  und der Suszeptanz (Blindleitwert)  $B$  ergeben sich die folgenden Gleichungen für die Leitwerte:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{L1} &= G_{L1} + j \cdot B_{L1} \\ \underline{Y}_{L2} &= G_{L2} + j \cdot B_{L2} \\ \underline{Y}_{L3} &= G_{L3} + j \cdot B_{L3}\end{aligned}\tag{4}$$

Damit werden die Real- und Imaginärteile der symmetrischen Komponenten der Leiterströme wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}(\underline{I}_1) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (G_{L1} + G_{L2} + G_{L3}) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_1) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (B_{L1} + B_{L2} + B_{L3}) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_2) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (G_{L1} - \frac{1}{2} \cdot G_{L2} - \frac{1}{2} \cdot G_{L3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{L2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{L3}) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_2) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (B_{L1} - \frac{1}{2} \cdot B_{L2} - \frac{1}{2} \cdot B_{L3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{L2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{L3}) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_0) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (G_{L1} - \frac{1}{2} \cdot G_{L2} - \frac{1}{2} \cdot G_{L3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{L2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{L3}) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_0) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (B_{L1} - \frac{1}{2} \cdot B_{L2} - \frac{1}{2} \cdot B_{L3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{L2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{L3})\end{aligned}\tag{5}$$

Mit den Bezeichnungen

$$\begin{aligned}G_{\Sigma} &= G_{L1} - \frac{1}{2} \cdot G_{L2} - \frac{1}{2} \cdot G_{L3} \\ B_{\Sigma} &= B_{L1} - \frac{1}{2} \cdot B_{L2} - \frac{1}{2} \cdot B_{L3}\end{aligned}\tag{6}$$

und

$$\begin{aligned}\Delta G &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (G_{L2} - G_{L3}) \\ \Delta B &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (B_{L2} - B_{L3})\end{aligned}\tag{7}$$

lassen sich die Gleichungen (5) wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}(\underline{I}_1) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (G_{L1} + G_{L2} + G_{L3}) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_1) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (B_{L1} + B_{L2} + B_{L3}) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_2) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (G_{\Sigma} - \Delta B) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_2) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (B_{\Sigma} + \Delta G) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_0) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (G_{\Sigma} + \Delta B) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_0) &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot (B_{\Sigma} - \Delta G)\end{aligned}\tag{8}$$

Es ist unschwer zu erkennen, dass ein Zusammenhang zwischen den entsprechenden

Komponenten des Gegen- und Nullsystemstromes besteht. Dieser Zusammenhang wird nachfolgend an einigen Beispielen erläutert.

### Fall I: rein ohmsche Last

In diesem Fall gilt:

$$B_{L1} = B_{L2} = B_{L3} = 0 \quad (9)$$

sowie

$$\begin{aligned} B_{\Sigma} &= 0 \\ \Delta B &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Unter Berücksichtigung von (9) und (10) folgt aus den Gleichungen (8):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(I_2) &= \operatorname{Re}(I_0) \\ \operatorname{Im}(I_2) &= -\operatorname{Im}(I_0) \end{aligned} \quad (11)$$

Das bedeutet, dass die Gegen- und Nullsystemströme in diesem Fall die gleichen Beträge haben:

$$|I_0| = |I_2| \quad (12)$$

### Fall II: ohmsch-induktiver bzw. ohmsch-kapazitiver Last

Wenn wir davon ausgehen, dass die Belastung in jeder Phase des Drehstromsystems auf den gleichen Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi$  kompensiert ist, dann ergeben sich die folgenden Verhältnisse zwischen den Leitwerten:

$$\frac{B_{L1}}{G_{L1}} = \frac{B_{L2}}{G_{L2}} = \frac{B_{L3}}{G_{L3}} = \tan \varphi \quad (13)$$

Mit dieser Annahme ergibt sich aus den Gleichungen (6) und (7):

$$\begin{aligned} B_{\Sigma} &= B_{L1} - \frac{1}{2} \cdot B_{L2} - \frac{1}{2} \cdot B_{L3} = (G_{L1} - \frac{1}{2} \cdot G_{L2} - \frac{1}{2} \cdot G_{L3}) \cdot \tan \varphi = G_{\Sigma} \cdot \tan \varphi \\ \Delta B &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (B_{L2} - B_{L3}) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (G_{L2} - G_{L3}) \cdot \tan \varphi = \Delta G \cdot \tan \varphi \end{aligned} \quad (14)$$

Für den Betrag des Gegensystemstromes dann:

$$\begin{aligned}
I_2 = |I_2| &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{(G_\Sigma - \Delta B)^2 + (B_\Sigma + \Delta G)^2} = \\
&= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{(G_\Sigma^2 - 2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta B + (\Delta B)^2) + (B_\Sigma^2 + 2 \cdot B_\Sigma \cdot \Delta G + (\Delta G)^2)} = \\
&= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{(G_\Sigma^2 + B_\Sigma^2 + (\Delta B)^2 + (\Delta G)^2) + (-2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta B + 2 \cdot B_\Sigma \cdot \Delta G)} = \\
&= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{\Sigma_{GB} - \Delta_{GB}}
\end{aligned} \tag{15}$$

und für den Betrag des Nullsystemstromes:

$$\begin{aligned}
I_0 = |I_0| &= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{(G_\Sigma + \Delta B)^2 + (B_\Sigma - \Delta G)^2} = \\
&= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{(G_\Sigma^2 + 2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta B + (\Delta B)^2) + (B_\Sigma^2 - 2 \cdot B_\Sigma \cdot \Delta G + (\Delta G)^2)} = \\
&= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{(G_\Sigma^2 + B_\Sigma^2 + (\Delta B)^2 + (\Delta G)^2) + (2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta B - 2 \cdot B_\Sigma \cdot \Delta G)} = \\
&= \frac{U_{L1}}{3} \cdot \sqrt{\Sigma_{GB} + \Delta_{GB}}
\end{aligned} \tag{16}$$

mit

$$\begin{aligned}
\Sigma_{GB} &= G_\Sigma^2 + B_\Sigma^2 + (\Delta B)^2 + (\Delta G)^2 \\
\Delta_{GB} &= 2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta B - 2 \cdot B_\Sigma \cdot \Delta G
\end{aligned} \tag{17}$$

Unter Berücksichtigung von (14) ergibt sich:

$$\Delta_{GB} = 2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta B - 2 \cdot B_\Sigma \cdot \Delta G = 2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta G \cdot \tan \varphi - 2 \cdot G_\Sigma \cdot \Delta G \cdot \tan \varphi \equiv 0 \tag{18}$$

Das bedeutet, dass der Betrag des Nullsystemstromes gleich dem Betrag des Gegensystemstromes ist unabhängig von der Größe von  $\tan \varphi$  bzw.  $\cos \varphi$ .

$$|I_0| = |I_2| \tag{19}$$

Die Ergebnisse für die beiden beschriebenen Fälle sowie für einige weitere praktisch relevante Fälle sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Ergebnisse der analytischen Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Gegen- und der Nullsystemstromkomponente

Konduktanz G	Suszeptanz B	Cosφ	I <sub>0</sub> vs I <sub>2</sub>
B <sub>L1</sub> /G <sub>L1</sub> = B <sub>L2</sub> /G <sub>L2</sub> = B <sub>L3</sub> /G <sub>L3</sub>		Cosφ <sub>L1</sub> =Cosφ <sub>L2</sub> =Cosφ <sub>L3</sub>	I <sub>0</sub>   =  I <sub>2</sub>
G <sub>L1</sub> =G <sub>L2</sub> =G <sub>L3</sub>	B <sub>L1</sub> ≠ B <sub>L2</sub> ≠ B <sub>L3</sub>	Cosφ <sub>L1</sub> ≠ Cosφ <sub>L2</sub> ≠ Cosφ <sub>L3</sub>	I <sub>0</sub>   =  I <sub>2</sub>
G <sub>L1</sub> ≠ G <sub>L2</sub> ≠ G <sub>L3</sub>	B <sub>L1</sub> =B <sub>L2</sub> =B <sub>L3</sub>	Cosφ <sub>L1</sub> ≠ Cosφ <sub>L2</sub> ≠ Cosφ <sub>L3</sub>	I <sub>0</sub>   =  I <sub>2</sub>
G <sub>L1</sub> ≠ G <sub>L2</sub> = G <sub>L3</sub>	B <sub>L1</sub> ≠ B <sub>L2</sub> = B <sub>L3</sub>	Cosφ <sub>L1</sub> ≠ Cosφ <sub>L2</sub> =Cosφ <sub>L3</sub>	I <sub>0</sub> = I <sub>2</sub>



Der gefundene Zusammenhang ermöglicht es in vielen praktisch relevanten Fällen, die Größe des Nullsystemstromes durch Messung der Stromunsymmetrie bzw. durch Messung der Gegensystemstromkomponente im Drehstromsystem zu ermitteln. Damit lässt sich auch der Neutralleiterstrom auf diese Weise bestimmen.

Der Betrag des Neutralleiterstromes hat die dreifache Größe des Betrages des Nullsystemstromes:

$$I_{NL} = 3 \cdot |I_0| \quad (20)$$

## 2.2 Bestimmung der zu erwartenden Neutralleiterbelastung durch die Grundschwingung

Wie in Punkt 2.1 erläutert wurde, wird der Neutralleiterstrom in einem Vierleiter-Drehstromsystem bei Erfüllung der Anforderungen an die Blindleistungskompensation der Belastungen (Kompensation der Verschiebungsblindleistung) durch die Größe des Gegensystemstromes bestimmt.

In den geltenden Normen zur Elektroenergiequalität für Niederspannungsnetze werden die maximal zulässigen Grenzwerte für die Spannungsunsymmetrie  $U_2 / U_1$  festgelegt. Sie betragen 2 % für öffentliche Netze und 3 % für Industrienetze [3, 4].

Die entsprechenden Werte des maximal zulässigen Gegensystemstromes in Niederspannungsnetzen können aus den folgenden Überlegungen berechnet werden:

Betrachten wir die einpoligen Ersatzschaltbilder für das Mit- (Bild 4 a)) und das Gegensystem (Bild 4 b)).

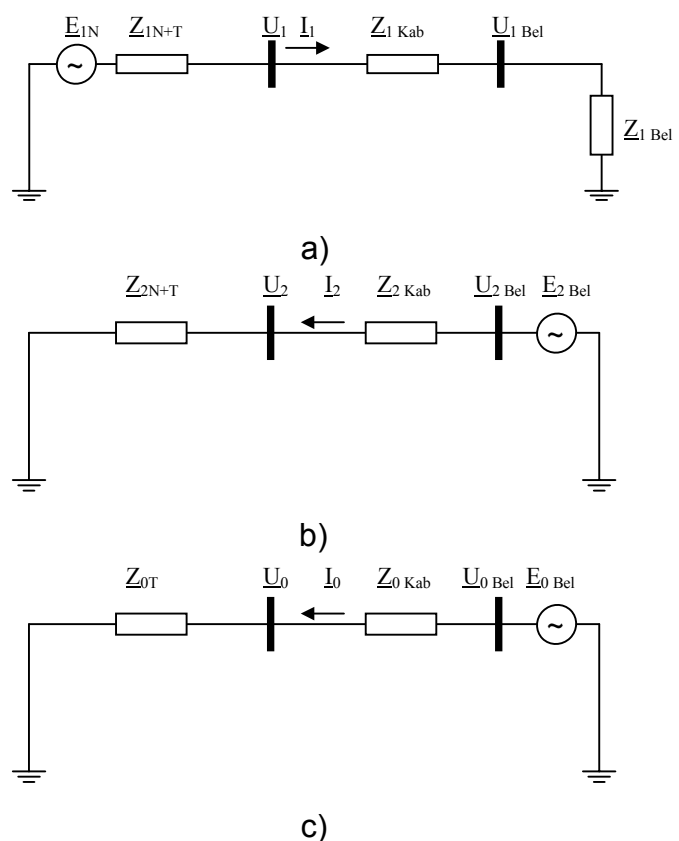


Bild 4: Vereinfachtes ESB eines NS-Netzes für die symmetrischen Komponenten der Grundschwingung

Entsprechend Bild 4 b) ergibt sich für die Gegensystemspannung:

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2N+T} \quad (21)$$

Die Mitsystemspannung wird entsprechend Bild 4 a) wie folgt berechnet:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{1N} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{1N+T} \quad (22)$$

Daraus ergibt sich das Verhältnis  $\underline{U}_2 / \underline{U}_1$  zu:

$$\left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| = \left| \frac{\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2N+T}}{\underline{E}_{1N} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{1N+T}} \right| \quad (23)$$

Unter Berücksichtigung der konventionellen Annahme

$$\underline{Z}_{1N+T} = \underline{Z}_{2N+T} \quad (24)$$

kann Gleichung (23) wie folgt vereinfacht werden:

$$\left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| = \frac{|\underline{I}_2|}{\left| \frac{\underline{E}_{1N}}{\underline{Z}_{2N+T}} - \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_{1N+T}}{\underline{Z}_{2N+T}} \right|} = \frac{|\underline{I}_2|}{\left| \frac{\underline{E}_{1N}}{\underline{Z}_{1N+T}} - \underline{I}_1 \right|} \quad (25)$$

Zur Einschätzung der Größe der EMK  $\underline{E}_{1N}$  in der Netzeinspeisung kann von den Überlegungen für Kurzschlussstromberechnungen [5] ausgegangen werden; dann gilt:

$$\underline{E}_{1N} = E_{1N} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

mit  $U_N$  - Netznennspannung (Leiter-Leiter),

$c$  - Spannungsbeiwert ( $c_{\max} = 1.1$  nach [5])

Weiterhin gilt gemäß [5] für den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom an der NS-Sammelschiene beim 3-poligen metallischen Kurzschluss :

$$\frac{\underline{E}_{1N}}{\underline{Z}_{1N+T}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{1N+T}} = \underline{I}_{k3}'' \quad (27)$$

Ausgehend davon, dass die 3-poligen metallischen Kurzschlussströme  $\underline{I}_{k3}''$  in Niederspannungsnetzen in meisten Fällen viel höher als die maximalen zulässigen Betriebsströme  $\underline{I}_1$  in den entsprechenden Netzzweigen sind, kann die Gleichung (25) noch weiter vereinfacht werden:

$$\left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| = \frac{|\underline{I}_2|}{\left| \frac{\underline{E}_{1N}}{\underline{Z}_{1N+T}} - \underline{I}_1 \right|} = \frac{|\underline{I}_2|}{|\underline{I}_{k3}'' - \underline{I}_1|} \cong \frac{|\underline{I}_2|}{|\underline{I}_{k3}''|} \quad (28)$$

Mit Hilfe der Bezeichnung

$$k_{2U} = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \quad (29)$$

und unter Berücksichtigung von (19) und (20) ergibt sich::

$$I_{NL1} = 3 \cdot |I_0| = 3 \cdot |I_2| \approx 3 \cdot k_{2U} \cdot I_{k3} \quad (30)$$

Gleichung (30) zeigt, dass der zu erwartende Neutralleiterstrom der Grundfrequenz durch den Grenzwert der zulässigen Spannungsunsymmetrie und die Kurzschlussstromwerte direkt eingeschätzt werden kann.

Unter Berücksichtigung der geltenden Normen zur Elektroenergiequalität kann der zu erwartende Neutralleiterstrom der Grundfrequenz 6 bzw. 9 % des zu erwartenden Anfangs-Kurzschlusswechselstromes an der NS-Anschlussstelle betragen.

In allgemeinen Fall mit  $B_{L1} \neq B_{L2} \neq B_{L3}$ ,  $G_{L1} \neq G_{L2} \neq G_{L3}$  und  $\cos\varphi_{L1} \neq \cos\varphi_{L2} \neq \cos\varphi_{L3}$  ergibt sich:

$$I_{NL1} = 3 \cdot |I_0| \approx 3 \cdot k_{0U} \cdot I_{k3} \quad (31)$$

mit  $k_{0U} = \left| \frac{U_0}{U_1} \right|$  - Faktor zur Charakterisierung des Verhältnisses der Nullsystemspannung zur Mitsystemspannung.

Unter der Voraussetzung, dass alle Leiterbelastungen gleichen Verschiebungsfaktor  $\cos\varphi$  besitzen, kann der Neutralleiterstrom maximal den Wert des Außenleiterstromes annehmen. Wenn weiterhin vorausgesetzt wird, dass der maximal zulässige Wert des Leiterstromes im NS-Netz den Bemessungsstrom des Abspanntransformators nicht überschreiten darf [6], ergibt sich der natürliche Grenzwert für den maximal zu erwartenden Neutralleiterstrom der Grundschwingung (50 Hz):

$$I_{NL1} = I_{rT} \quad (32)$$

mit  $I_{rT}$  - Transformatorbemessungsstrom.

Für die Bestimmung des maximal zu erwartenden Neutralleiterstromes der Grundschwingung in einem Kabel-Abgang gelten grundsätzlich die gleichen Annahmen. Ausgehend davon, dass der maximal zulässige Wert des NS-Leiterstromes im Kabel-Abgang des NS-Netzes den Bemessungsstrom des entsprechenden Kabels nicht überschreiten darf, kann auch der natürliche Grenzwert für den maximal zu erwartenden Neutralleiterstrom der Grundschwingung auch nach Formel (32) bestimmt werden. Dabei muss der Transformatorbemessungsstromes  $I_{rT}$  in die Formel (32) durch den Kabelbemessungsstrom  $I_{rKab}$  substituiert werden.

## 2.3 Bestimmung der zu erwartenden Neutralleiterbelastung durch die Oberschwingungen

Ebenso wie die Ströme und Spannungen der Grundschwingung können auch die in einem Drehstromnetz vorhandenen Oberschwingungen in symmetrische Komponenten zerlegt werden. Allerdings bestimmen die Frequenzen der Oberschwingungen direkt die Größe der entsprechenden Mit-, Gegen- und Nullsystemkomponenten.

Bei gleicher Oberschwingungs-Störemission in jeder Phase des Drehstromsystems gehören die Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen 4, 7, 10, 13, etc. nur zum Mitsystem, die Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen 2, 5, 8, 11, 14, etc. nur zum Gegensystem und alle durch drei teilbaren Oberschwingungen zum Nullsystem. Das heißt, dass die Neutralleiterbelastung unter o. g. Annahme ausschließlich durch die Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen  $h = 3 \cdot n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) verursacht wird.

Zur Einschätzung der zu erwartenden Neutralleiterbelastung durch die Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen  $h = 3 \cdot n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) werden die im Punkt 2.2 beschriebenen Annahmen betrachtet.

In den geltenden Normen zur Elektroenergiequalität für Niederspannungsnetze sind die maximal zulässigen Grenzwerte für die einzelnen Oberschwingungen für das Verhältnis  $U_h/U_1$  (mit  $U_h$  - Spannungseffektivwert der entsprechenden Oberschwingung,  $U_1$  - Spannungseffektivwert der Grundfrequenz) festgelegt. Die entsprechenden Werte für die 3. Harmonische betragen 5 % (öffentliche Netze) bzw. 6 % (Industrienetze) [3], [4].

Unter der o. g. Annahme der Symmetrie der Störemission wird die Oberschwingungsspannung der relevanten Harmonischen  $h = 3 \cdot n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) nur durch die Nullsystemspannung gebildet:

$$\underline{U}_{L1h} = \underline{U}_{1h} + \underline{U}_{2h} + \underline{U}_{0h} = \underline{U}_{0h} \quad (33)$$

Bei Erfüllung der Anforderungen an die Spannungsunsymmetrie für die Grundfrequenz ( $k_{2U}$  ist kleiner als 2 bzw. 3 %) kann die Grundschwingungsspannung wie folgt bestimmt werden:

$$\underline{U}_{L11} \approx \underline{U}_{11} = \underline{U}_1 \quad (34)$$

Dies ermöglicht es, die Einschätzung der zu erwartenden Neutralleiterbelastung auf der Grundlage des Verhältnisses  $|\underline{U}_{0h}/\underline{U}_1|$  durchzuführen.

Bild 5 a) stellt das Ersatzschaltbild für das Mitsystem der Grundschwingung in einem Drehstromnetz dar. Dieses Bild ist mit dem Bild 4 a) identisch. In Bild 5 b) wird das Ersatzschaltbild für das Nullsystem für eine durch drei teilbare Harmonische gezeigt. Das Ersatzschaltbild für das Nullsystem beinhaltet keine Impedanz für das speisende Netz. Dies entspricht der Nachbildung des Transformators mit der Schaltgruppe Dyn5 (Bild 2).

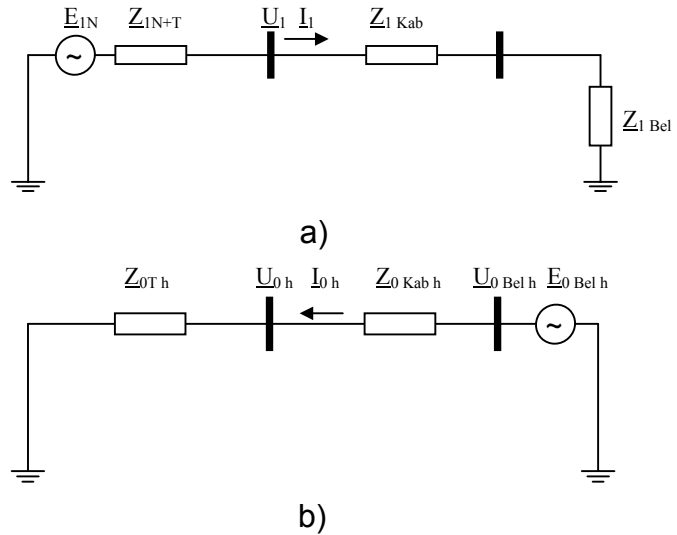


Bild 5: Vereinfachtes ESB eines NS-Netzes für das Mitsystem der Grundschwingung und das Nullsystem der Oberschwingung

Das Verhältnis  $\left| \frac{U_{0h}}{U_1} \right|$  kann ausgehend davon wie folgt dargestellt werden:

$$\left| \frac{U_{0h}}{U_1} \right| = \left| \frac{I_{0h} \cdot Z_{0Th}}{E_{1N} - I_1 \cdot Z_{1N+T}} \right| \quad (35)$$

Durch Umformung ergibt sich:

$$\left| \frac{U_{0h}}{U_1} \right| = \frac{|I_{0h}|}{\left| \frac{E_{1N}}{Z_{0Th}} - I_1 \cdot \frac{Z_{1N+T}}{Z_{0Th}} \right|} \quad (36)$$

Nach [7] kann die Transformatorimpedanz  $Z_{0Th}$  des Nullsystems für die Oberschwingung h unter Berücksichtigung des Skin-Effektes wie folgt vereinfacht dargestellt werden:

$$Z_{0Th} = h \cdot Z_{0T} = h \cdot Z_{1T} \quad (37)$$

Daraus folgt:

$$\left| \frac{U_{0h}}{U_1} \right| = \frac{|I_{0h}|}{\left| \frac{E_{1N}}{h \cdot Z_{1T}} - I_1 \cdot \frac{Z_{1N+T}}{h \cdot Z_{1T}} \right|} = \frac{h \cdot |I_{0h}|}{\left| \frac{E_{1N}}{Z_{1T}} - I_1 \cdot \frac{Z_{1N+T}}{Z_{1T}} \right|} \quad (38)$$

Unter Berücksichtigung von (26) ergibt sich:

$$\frac{E_{1N}}{Z_{1T}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{1T}} = I_{Tk3}'' \quad (39)$$

mit  $I_{Tk3}''$  - Anfangs-Kurzschlusswechselstrom an der NS-Sammelschiene bei 3-poligem metallischen Kurzschluss unter Annahme einer unendlich großen Kurzschlussleistung der Netzeinspeisung.

Ausgehend davon, dass das Verhältnis  $|\underline{Z}_{1N+T}/\underline{Z}_{1T}|$  im Bereich von 1.0 ... 1.5 liegt [6] und damit  $|\underline{I}_{Tk3}''| \geq |\underline{I}_{k3}''|$  ist, kann das Glied  $\underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_{1N+T}}{\underline{Z}_{1T}}$  in Gleichung (38) vernachlässigt werden.

Mit der Bezeichnung

$$u_h = \left| \frac{\underline{U}_{0h}}{\underline{U}_1} \right| \quad (40)$$

ergibt sich für den Nullsystemstromeffektivwert der Harmonischen  $h = 3 \cdot n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ):

$$I_{0h} = |\underline{I}_{0h}| \approx \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'' \quad (41)$$

Daraus folgt:

$$I_{NLh} = 3 \cdot |\underline{I}_{0h}| \approx 3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'' \quad (42)$$

Der summarische Neutraleiterstrom, der durch die Oberschwingungen verursacht wird, berechnet sich wie folgt:

$$I_{NLh\Sigma} \approx \sqrt{\sum_h \left( 3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'' \right)^2} = 3 \cdot I_{Tk3}'' \cdot \sqrt{\sum_h \left( \frac{1}{h} \cdot u_h \right)^2} \quad (43)$$

Der gesamte Neutraleiterstrom ergibt sich aus dem Anteil durch die Grundschwingung und dem summarischen Neutraleiterstrom durch Oberschwingungen als:

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{(I_{NL1})^2 + \sum_h \left( 3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'' \right)^2} \quad (44)$$

Unter Berücksichtigung von  $|\underline{I}_{Tk3}''| \geq |\underline{I}_{k3}''|$  kann der maximalen zu erwartenden Neutraleiterstrom eingeschätzt werden:

$$I_{NLmax} \approx 3 \cdot I_{Tk3}'' \cdot \sqrt{(k_{2U})^2 + \sum_h \left( \frac{1}{h} \cdot u_h \right)^2} \quad (45)$$

Unter Berücksichtigung der zulässigen Strombelastung der Leiter

$$I_{L1} \leq I_{rT} \quad (46)$$

beträgt der Maximalwert des Leiterstromes der Grundfrequenz für den Fall des Vorhandenseins von Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen  $h = 3 \cdot n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ):

$$I_{L11} = \sqrt{(I_{rT})^2 - \sum_h I_{L1h}^2} \approx \sqrt{(I_{rT})^2 - \sum_h \left( \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'' \right)^2} \quad (47)$$

Der maximal zu erwartende Neutralleiterstrom ergibt sich unter Berücksichtigung von:

$$I_{NL1} = I_{L11} \quad (48)$$

zu:

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{((I_{rT})^2 - \sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2) + \sum_h (3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2} \quad (49)$$

Nach Umformung und Vereinfachung folgt:

$$I_{NL\Sigma} \approx \sqrt{(I_{rT})^2 + 8 \cdot (\sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2)} \quad (50)$$

Die Bedingung (48) ist nur in den Fällen  $I_{L2} = 0$  bzw.  $I_{L3} = 0$  (zweiphasige Belastung) oder  $I_{L2} = I_{L3} = 0$  (einphasige Belastung) erfüllt. Daraus folgt, dass die Oberschwingungsstromkomponenten in den unbelasteten Phasen des Drehstromsystems ebenfalls Null werden. Aus Gleichung (49) ergibt sich:

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{((I_{rT})^2 - \sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2) + \sum_h (2 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2} \quad (51)$$

bei zweiphasiger Last, und

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{((I_{rT})^2 - \sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2) + \sum_h (1 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2} \quad (52)$$

bei einphasiger Last.

Für den zu erwartenden maximalen Neutralleiterstrom folgt:

$$I_{NL\Sigma} \approx \sqrt{(I_{rT})^2 + 3 \cdot (\sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I_{Tk3}'')^2)} \quad (53)$$

bei zweiphasiger Last, und

$$I_{NL\Sigma} \approx \sqrt{(I_{rT})^2} = I_{rT} \quad (54)$$

bei einphasiger Last.

Die Gleichungen (32) sowie (50) bis (54) zeigen, dass der zu erwartende Neutralleiterstrom im allgemeinen durch die Spannungsqualitäts-Parameter, die Betriebsmittelcharakteristika und die Kurzschlussstromwerte eingeschätzt werden kann. Zur Bewertung des maximalen zu erwartenden Neutralleiterstromes eines Kabel-Abganges können die Ersatzschaltbilder angewendet werden, die in Bild 4 dargestellt sind.

Dabei wird das Verhältnis  $|\underline{U}_{0h}/\underline{U}_1|$  durch das Verhältnis  $|\underline{U}_{0Belh}/\underline{U}_{1Bel}|$  am Belastungsknotenpunkt ersetzt:

$$\left| \frac{\underline{U}_{0\text{Bel } h}}{\underline{U}_{1\text{Bel}}} \right| = \left| \frac{\underline{I}_{0h} \cdot (\underline{Z}_{0Th} + \underline{Z}_{0Kab h})}{\underline{E}_{1N} - \underline{I}_1 \cdot (\underline{Z}_{1N+T} + \underline{Z}_{0Kab 1})} \right| \quad (55)$$

Die Gleichung (55) kann wie folgt transformiert werden:

$$\left| \frac{\underline{U}_{0\text{Bel } h}}{\underline{U}_{1\text{Bel}}} \right| = \left| \frac{\underline{I}_{0h}}{\frac{\underline{E}_{1N}}{\underline{Z}_{0Th} + \underline{Z}_{0Kab h}} - \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_{1N+T} + \underline{Z}_{0Kab 1}}{\underline{Z}_{0Th} + \underline{Z}_{0Kab h}}} \right| \quad (56)$$

Unter Berücksichtigung des Skin-Effektes können die Transformatorimpedanz  $\underline{Z}_{0Th}$  sowie die Kabelimpedanz  $\underline{Z}_{0Kab h}$  des Nullsystems für die Oberschwingung  $h$  vereinfacht dargestellt werden:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{0Th} &= h \cdot \underline{Z}_{0T1} \\ \underline{Z}_{0Kab h} &= h \cdot \underline{Z}_{0Kab 1} \end{aligned} \quad (57)$$

Daraus folgt:

$$\left| \frac{\underline{U}_{0\text{Bel } h}}{\underline{U}_{1\text{Bel}}} \right| = \left| \frac{\underline{I}_{0h}}{\frac{\underline{E}_{1N}}{h \cdot (\underline{Z}_{0T1} + \underline{Z}_{0Kab 1})} - \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_{1N+T} + \underline{Z}_{0Kab 1}}{h \cdot (\underline{Z}_{0T1} + \underline{Z}_{0Kab 1})}} \right| = \left| \frac{h \cdot \underline{I}_{0h}}{\frac{\underline{E}_{1N}}{\underline{Z}_{0T1} + \underline{Z}_{0Kab 1}} - \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_{1N+T} + \underline{Z}_{0Kab 1}}{\underline{Z}_{0T1} + \underline{Z}_{0Kab 1}}} \right| \quad (58)$$

Für die Transformatorimpedanz gilt weiterhin Gleichung (57). Die Kabelimpedanz  $\underline{Z}_{0Kab 1}$  kann nach [8], [9] wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{0Kab 1} &= R_{0Kab 1} + j \cdot X_{0Kab 1} \\ R_{0Kab 1} &= R_{1Kab 1} + 3 \cdot R_{1NL 1} \\ X_{0Kab 1} &\approx (3.5 \dots 4.0) \cdot X_{1Kab 1} \quad (\text{Fall a))} \\ X_{0Kab 1} &\approx (1.3 \dots 1.8) \cdot X_{1Kab 1} \quad (\text{Fall b))} \end{aligned} \quad (59)$$

mit  $R_{1NL 1}$  - Resistanz des Neutralleiters des Mitsystems für die Grundschwingung,

$R_{1Kab 1}$  - Resistanz des Außenleiters des Mitsystems für die Grundschwingung,

$X_{1Kab 1}$  - Reaktanz des Außenleiters des Mitsystems für die Grundschwingung.

Der Fall a) in (59) gilt für Vierleiterkabel mit gleichen Querschnitten der Außen- und des Neutralleiters; Fall b) dagegen für Dreileiterkabel mit verminderten PEN- oder Schutzleiterquerschnitten bzw. für Dreileiterkabel mit Schirm. Die genauen Werte der Kabelresistenzen und -reaktanzen können aus Tabellen oder Herstellerangaben entnommen werden.

Unter Berücksichtigung von (26), (57) und (59) ergibt sich:



$$\frac{\underline{E}_{1N}}{\underline{Z}_{0T1} + \underline{Z}_{0Kab1}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_{1T} + \underline{Z}_{0Kab1})} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot ((\underline{Z}_{1T} + \underline{Z}_{1Kab1}) + (3 \cdot R_{1NL1} + j \cdot K_{X0} \cdot X_{1Kab1}))} =$$

$$\frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_{1T} + \underline{Z}_{1Kab1})} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot R_{1NL1} + j \cdot K_{X0} \cdot X_{1Kab1}}{\underline{Z}_{1T} + \underline{Z}_{1Kab1}}} = \underline{I}_{TKabk3}'' \cdot \frac{1}{\underline{K}_{Z0}} \quad (60)$$

mit  $\underline{I}_{TKabk3}''$  - Anfangs-Kurzschlusswechselstrom am Belastungsanschlusspunkt bei 3-poligem metallischen Kurzschluss unter Annahme einer unendlich großer Kurzschlussleistung der Netzeinspeisung,  $\underline{K}_{Z0}$  - Reduktionsfaktor.

Der Reduktionsfaktor beträgt

$$\underline{K}_{Z0} = 1 + \frac{3 \cdot R_{1NL1} + j \cdot K_{X0} \cdot X_{1Kab1}}{\underline{Z}_{1T} + \underline{Z}_{1Kab1}} \quad (61)$$

Der Zahlenwert des Reduktionsfaktor  $\underline{K}_{Z0}$  kann wie folgt eingeschätzt werden: Bei Anschluss der Belastung direkt an der Trafostation bzw. bei kurzem Kabel-Abgang können die Impedanzwerte  $R_{1Kab1}$  und  $X_{1Kab1}$  vernachlässigt werden. Dann ergibt sich ein Reduktionsfaktor  $\underline{K}_{Z0} = 1$ . Dies entspricht dem Minimalwert, den  $\underline{K}_{Z0}$  annehmen kann. Bei sehr großen Entfernungen des Belastungsanschlusspunktes von der Trafostation kann im Gegensatz dazu die Transformatorimpedanz vernachlässigt werden. Dabei wird der Reduktionsfaktor im Fall a) (*Vierleiterkabel mit gleichem Querschnitten des Außen- und Neutralleiters*) den Maximalwert  $\underline{K}_{Z0} = 4$  nicht überschreiten. Im Fall b) (*Dreileiterkabel mit verminderten PEN- oder Schutzleiterquerschnitten*) vergrößert sich der Maximalwert des Reduktionsfaktors bis zu  $\underline{K}_{Z0} = 7.5$ .

Entsprechend der anderen Entfernung des Belastungsanschlusspunktes von der Trafostation wird der Reduktionsfaktor im Bereich zwischen Maximal- und Minimalwerten liegen. Der genaue Wert des Reduktionsfaktors muss nach (61) errechnet werden.

Unter Berücksichtigung, dass das Verhältnis  $|\underline{Z}_{1N+T}/\underline{Z}_{1T}|$  im Bereich von 1.0 ... 1.5 liegt [6], und dass  $|\underline{I}_1| \leq I_{rKab}$  (mit  $I_{rKab}$  - Kabelbemessungsstrom) ist, kann Gleichung (58) im

Bereich  $\left| \underline{I}_{TKabk3}'' \cdot \frac{1}{\underline{K}_{Z0}} \right| \gg I_{rKab}$  wie folgt vereinfacht werden:

$$\left| \frac{\underline{U}_{0Belh}}{\underline{U}_{1Bel}} \right| = \left| \frac{h \cdot \underline{I}_{0h}}{\underline{I}_{TKabk3}'' \cdot \frac{1}{\underline{K}_{Z0}}} \right| \quad (62)$$

Mit der Bezeichnung

$$u_h = \left| \frac{U_{0 \text{ Bel } h}}{U_{1 \text{ Bel}}} \right| \quad (63)$$

ergibt sich für den Nullsystemstromeffektivwert der Harmonischen  $h = 3 \cdot n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ):

$$I_{0h} = |I_{0h}| \approx \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \quad (64)$$

Daraus folgt:

$$I_{NLh} = 3 \cdot |I_{0h}| \approx 3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \quad (65)$$

Der summarische Neutralleiterstrom, der durch die Oberschwingungen verursacht wird, berechnet sich wie nach:

$$I_{NLh\Sigma} \approx \sqrt{\sum_h \left( 3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \right)^2} = 3 \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \cdot \sqrt{\sum_h \left( \frac{1}{h} \cdot u_h \right)^2} \quad (66)$$

Der gesamte Neutralleiterstrom ergibt sich als:

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{(I_{NL1})^2 + \sum_h \left( 3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \right)^2} \quad (67)$$

Unter Berücksichtigung der zulässigen Strombelastung des Leiters

$$I_{L1} \leq I_{r \, Kab} \quad (68)$$

kann der Maximalwert des Leiterstromes der Grundschwingung für den Fall des Vorhandenseins von Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen  $h = 3 \cdot n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) wie folgt bestimmt werden:

$$I_{L11} = \sqrt{(I_{r \, Kab})^2 - \sum_h I_{L1h}^2} \approx \sqrt{(I_{r \, Kab})^2 - \sum_h \left( \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \right)^2} \quad (69)$$

Der maximal zu erwartende Neutralleiterstrom ergibt sich für:

$$I_{NL1} = I_{L11} \quad (70)$$

zu:

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{\left( (I_{r \, Kab})^2 - \sum_h \left( \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \right)^2 \right) + \sum_h \left( 3 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \right)^2} \quad (71)$$

Nach Vereinfachung folgt:

$$I_{NL\Sigma} \approx \sqrt{(I_{r \, Kab})^2 + 8 \cdot \left( \sum_h \left( \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKab \, k3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}} \right)^2 \right)} \quad (72)$$

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Bedingung (70) weiterhin nur in den Fällen  $I_{L2} = I_{L3} = 0$  oder  $I_{L2} = 0$  bzw.  $I_{L3} = 0$  erfüllt wird, folgt daraus, dass die Oberschwingungsstromkomponenten in den unbelasteten Phasen des Drehstromsystems ebenfalls gleich Null werden. Aus Gleichung (71) folgt:

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{((I_{rKab})^2 - \sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKabk3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}})^2) + \sum_h (2 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKabk3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}})^2} \quad (73)$$

für *zweiphasige* Last, und

$$I_{NL\Sigma} = \sqrt{(I_{NL1})^2 + (I_{NLh\Sigma})^2} \approx \sqrt{((I_{rKab})^2 - \sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKabk3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}})^2) + \sum_h (1 \cdot \frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKabk3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}})^2} \quad (74)$$

für *einphasige* Last.

Entsprechend ergibt sich der zu erwartende maximal Neutraleiterstrom:

$$I_{NL\Sigma} \approx \sqrt{(I_{rKab})^2 + 3 \cdot (\sum_h (\frac{1}{h} \cdot u_h \cdot I''_{TKabk3} \cdot \frac{1}{K_{Z0}})^2)} \quad (75)$$

bei *zweiphasiger* Last, und

$$I_{NL\Sigma} \approx \sqrt{(I_{rKab})^2} = I_{rKab} \quad (76)$$

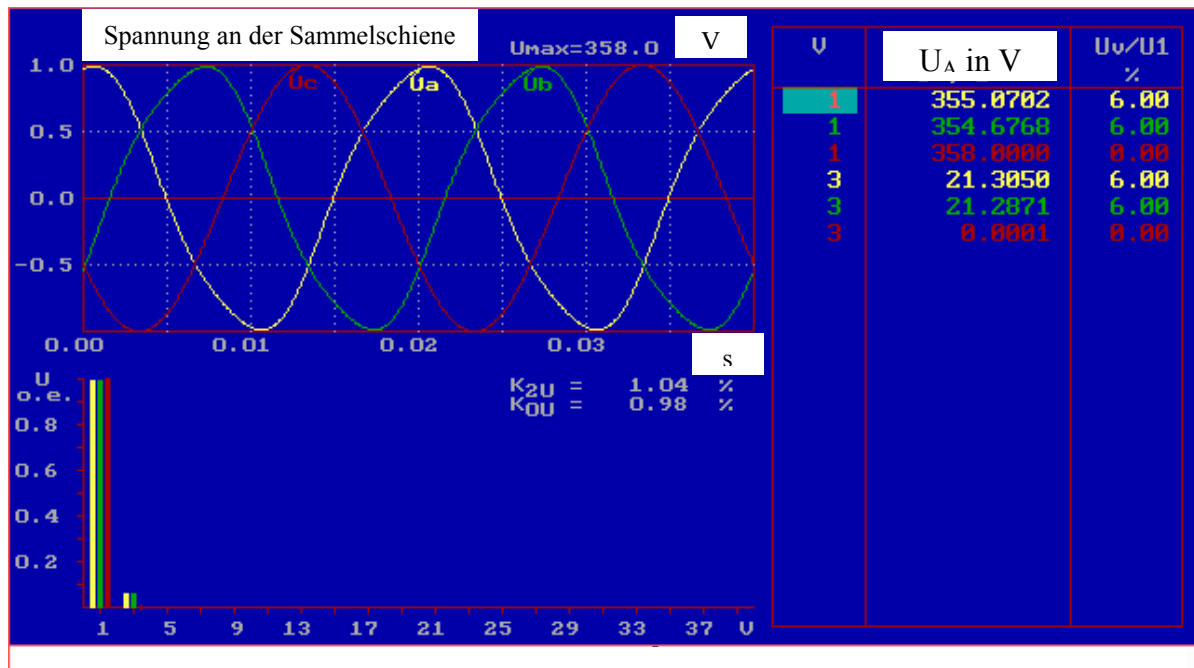
bei *einphasiger* Last.

*Die Gleichungen (73) bis (76) ermöglichen es, den zu erwartende Neutraleiterstrom in einem Kabel-Abgang durch die Spannungsqualitäts-Parameter an der Belastungsanschlussstelle, die Betriebsmittelcharakteristika sowie die Kurzschlussstromwerte einzuschätzen.*

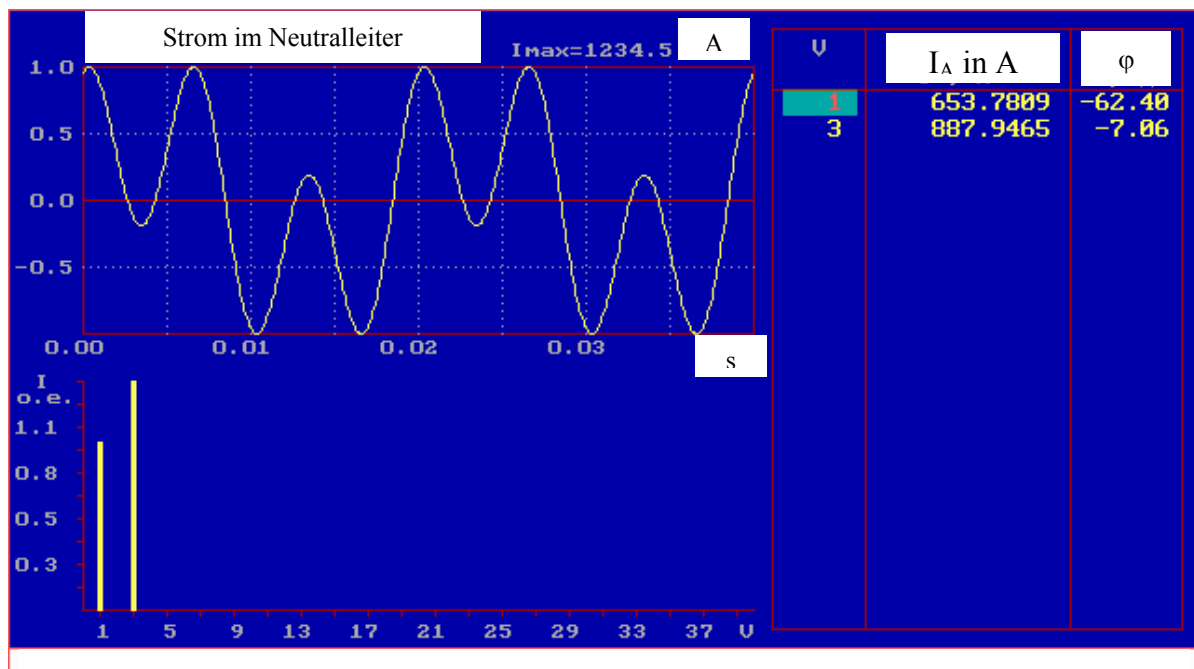
## 2.4 Digitale Netzberechnungen der Neutraleiterbelastung

Zur digitalen Simulation der unsymmetrischen Betriebsverhältnisse in Niederspannungsnetzen unter Berücksichtigung von Oberschwingungen wurde die Software GAMMA [10] eingesetzt. Diese Software ermöglicht es, stationäre Betriebszustände in elektrischen Netzen mit nichtlinearen bzw. unsymmetrischen Belastungen zu berechnen. Das Programm basiert auf dem Verfahren der harmonischen Bilanz. Die Strom-Spannungs-Verhältnisse werden für jede einzelne Harmonische separat ermittelt und, falls erforderlich, durch Anwendung von Iterationsrechnungen präzisiert. Dadurch wird es möglich, die tatsächlichen Frequenzabhängigkeiten der Impedanzen der einzelnen Betriebsmittel (Transformatoren, Kabel, etc.) korrekt nachzubilden. So wird z. B. die durch den Skin-Effekt bedingte Resistanz-Erhöhung bei Transformatoren und Kabeln bei höheren Frequenzen korrekt berücksichtigt.

Bild 6 zeigt ein Berechnungsbeispiel für die summarische Neutralleiterbelastung durch die 3. Harmonische bei zweiphasigem Betrieb einer Belastung, die an der NS-Sammelschiene der Ortsnetztransformatorstation ( $S_{rT} = 400 \text{ kVA}$ ,  $u_k = 4\%$ ) angeschlossen ist. Die Spannung der 3. Harmonische an der Sammelschiene beträgt 6%.



a)



b)

Bild 6: Simulationsbeispiel, zweiphasiger Betrieb einer nichtlinearen NS-Lastung.

Der theoretische Effektivwert des Neutralleiterstromes nach (50) beträgt für dieses Beispiel  $I_{NL\Sigma} = 797.65 \text{ A}$ . Simulationsberechnung liefert den Wert von

$$I_{NL\Sigma\text{ Sim}} = \sqrt{\frac{653.78^2 + 887.95^2}{2}} = 779.7 \text{ A}.$$

Der relative Unterschied zwischen den beiden Werten

$$\text{betr\"agt } \delta I = \left| \frac{I_S - I_{NL\Sigma}}{I_{NL\Sigma}} \right| \cdot 100\% = 2.2\%$$

Weitere Simulationsbeispiele sind in [6] zusammengefasst. Aus den Berechnungsergebnissen ist ersichtlich, dass die Resultate der digitalen Simulation eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Berechnungen zeigen. Dadurch bestätigt sich die Anwendbarkeit der gewonnenen vereinfachten theoretischen Formeln zur Ermittlung der Neutralleiterbelastung zur Berücksichtigung unsymmetrischer und nichtsinusförmiger Strom-Spannungs-Verhältnisse in elektrischen Niederspannungsnetzen.

### 3 Berechnungsergebnisse

Das Beispielnetz entspricht der in Bild 1 dargestellten typischen Netzstruktur mit einem Transformator  $S_{rT}=2500 \text{ kVA}$  und einem Aluminium-Kabel  $3 \times 150/70 \text{ mm}^2$ . Es sind Fälle unterschiedlicher Verzerrung ohne ( $k_{2u} = 0$ ) und mit Unsymmetrie ( $k_{2u} < 2\%$ ) der Spannung am Anschlusspunkt der Belastung dargestellt. Die Werte der 3. Harmonischen  $u_h$  entsprechen den zulässigen Grenzwerten der IEC-Normen [3] für Klasse 2 bzw. 3. Der Effektivwert des Neutralleiterstroms ist auf den Bemessungsstrom des Kabels bezogen und in Abhängigkeit von der Kabellänge angegeben. Es ist ersichtlich, dass das Verhältnis des Neutralleiter- zum Kabelbemessungsstrom auch Werte über 200% annehmen kann. Dabei sei angemerkt, dass im Berechnungsbeispiel keine Überlastungen der Außenleiter und keine unzulässigen Bedingungen hinsichtlich der Spannungsqualität vorliegen.

Bild 7 verdeutlicht die aus den durchgeführten Untersuchungen abgeleitete verallgemeinerte Schlussfolgerung, dass trotz Einhaltung der für NS-Netze in [3] festgelegten Grenzwerte zur Spannungsunsymmetrie und zu den Oberschwingungsspannungen Überlastungen der Neutralleiter grundsätzlich möglich sind.

Weitere Berechnungsbeispiele sind in [6] zusammengefasst.

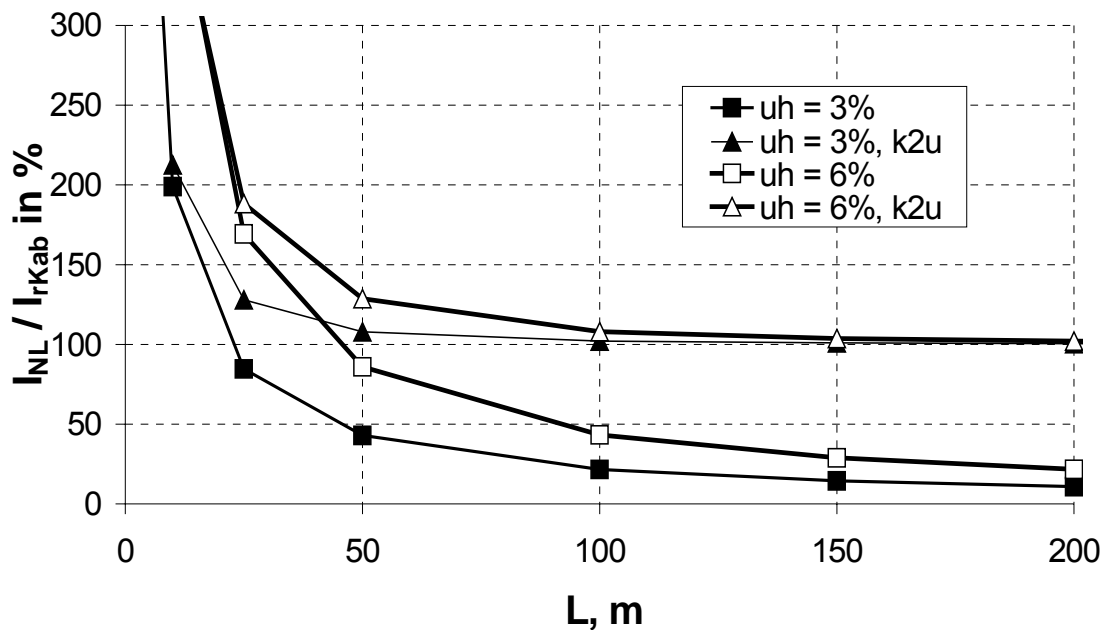


Bild 7: Bezogener Neutralleiterstrom in Abhängigkeit von der Kabellänge

In den Berechnungen wurde festgestellt, dass größere Werte der zu erwartenden Neutralleiterströme und Neutralleiterbelastungen insbesondere bei kurzen Kabellängen (bis zu 50 m) vorliegen können. Bei einer Entfernung des Belastungsanschlusspunktes von der Transformatorstation von 10 m wurden in den Berechnungen Überlastungen von über 300% ermittelt. Bei Beschränkung des Kabel-Außenleiterstromes auf den zulässigen Grenzeffektivwert ergibt sich bezogener Neutralleiterstromeffektivwert von 300%.

Bei größeren Entfernungen der Belastungsanschlusspunkte von den Transformatorstationen (ab 100 m) werden die zu erwartenden Neutralleiterströme erheblich reduziert. Die maximale Größe der zu erwartenden Neutralleiterströme überschreitet dann den Außenleiter-Kabelbemessungsstrom (100%) nur unwesentlich. Die Berechnungsergebnisse haben gezeigt, dass die zu erwartenden Neutralleiterströme bei Vierleiterkabeln (symmetrischer Aufbau) im Vergleich zu den Neutralleiterströmen bei Dreileiterkabeln mit vermindertem PEN- oder Schutzleiterquerschnitt im Grunde genommen größer sind. Allerdings ist dies nur bei kleinen Kabellängen (bis zu 50 m) und relativ kleinen Außenleiterquerschnitten (bis zu  $70 \text{ mm}^2$ ) bei Kabeln mit Kupferleitern feststellbar. Bei Kabeln mit Aluminiumleitern sind die Werte der zu erwartenden Neutralleiterströme etwa gleich groß. Hinsichtlich der zu erwartenden thermischen Belastung des Neutralleiters bedeutet dies, dass für den Neutralleiter in Dreileiterkabeln mit vermindertem PEN- oder Schutzleiterquerschnitt

(halber Außenleiterquerschnitt) damit die doppelte Überlastung im Vergleich zu den Vierleiterkabeln (symmetrischer Aufbau) vorliegt.

Der Vergleich der zu erwartenden Neutralleiterströme in Kabeln mit unterschiedlichen Leitermaterials hat auch gezeigt, dass die Neutralleiterströme in Kabeln mit Aluminiumleitern größer sind als in Kabeln mit Kupferleitern. Das gilt sowohl für Dreileiterkabel mit vermindertem PEN- oder Schutzleiterquerschnitt als auch für Vierleiterkabel (symmetrischer Aufbau). Allerdings sind diese Unterschiede nur bei kleinen Kabellängen (bis zu 50 m) und relativ kleinen Außenleiterquerschnitten (bis zu 70 mm<sup>2</sup>) deutlich ausgeprägt.

Die Berechnungsergebnisse haben gezeigt, dass sich mit Erhöhung der Transformatorbemessungsleistung aufgrund der Verkleinerung der Transformator-Impedanz die zu erwartenden Neutralleiterströme ebenfalls vergrößern. Die gleiche Wirkung hat die Reduzierung der Transformator Kurzschlussleistung bei gleicher Transformatorbemessungsleistung. Aufgrund der Verkleinerung der Transformator-Impedanz bei den kleineren Kurzschlussleistungen erhöhen sich die zu erwartenden Neutralleiterströme.

Zusammenfassend kann aus den durchgeführten Berechnungen geschlossen werden:

- Trotz Einhaltung der im Niederspannungsnetz in den Normen festgelegten Grenzwerte sowohl zur Grundschnungsspannungsunsymmetrie als auch zu den Oberschnungsspannungen sind Überlastungen der Neutralleiter grundsätzlich möglich.
- Die Berücksichtigung der Beschränkungen der zulässigen Phasenleiterströme auf die Bemessungsströme der Betriebsmittel reduziert die Neutralleiterströme, schließt aber die Überlastung des Neutralleiters nicht aus.
- Die 3. Harmonische hat eine ausschlaggebende Wirkung auf die zu erwartenden Neutralleiterbelastungen, die durch Oberschnungen verursacht werden können.
- Die Erhöhung der Kabellänge hat unter Berücksichtigung der Einhaltung der EEQ-Grenzwerte am Belastungsanschlusspunkt eine dämpfende Wirkung auf den zu erwartenden Neutralleiterstrom. Dies ist durch die entsprechende Kabel-Impedanz-Erhöhung bedingt.
- Die Erhöhung der Transformatorbemessungsleistung in der Transformatorstation

entlastet den Transformator selbst von den Nullsystemströmen (aufgrund der Erhöhung des Transformatorbemessungsstromes), erhöht aber die Neutralleiterströme in Kabel-Abgängen.

#### 4 Messtechnische Untersuchungen in NS-Netzen

Umfangreiche praktischen Messungen, die in einer Reihe von NS-Netzen durchgeführt wurden, haben die Korrektheit und Anwendbarkeit der entwickelten Methodik bestätigt. Tabelle 2 fasst die statistischen Charakteristika der ermittelten Null- und Gegensystemströme zusammen. In der Tabelle 2 sind die mathematischen Erwartungswerte (Mat. Erw.) und die Standardabweichungen (Std. Abw.) der Null- und Gegensystemströme sowie das Verhältnis der Erwartungswerte dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse der messtechnischen Ermittlung der Gegen- und Nullsystemstromkomponenten

Abnehmertyp	Messort	Messstelle	I <sub>0</sub>		I <sub>2</sub>		I <sub>0</sub> / I <sub>2</sub>
			Mat. Erw.	Std. Abw.	Mat. Erw.	Std. Abw.	
			[A]	[A]	[A]	[A]	
<b>Industrie</b>	Umspannwerk Fa. I	<i>Einspeisung</i>	<b>11.85</b>	5.57	<b>10.81</b>	6,62	<b>1.10</b>
		<i>Kabel</i>	<b>3.00</b>	1.17	<b>2.77</b>	1.06	<b>1.08</b>
	Umspannwerk Fa. II	<i>Einspeisung</i>	<b>5.10</b>	2.70	<b>11.70</b>	5.22	<b>0.44</b>
<b>Gewerbe</b>	Umspannwerk I	<i>Einspeisung</i>	<b>7.32</b>	3.31	<b>6.74</b>	3.06	<b>1.09</b>
	Umspannwerk II	<i>Kabel</i>	<b>6.12</b>	4.45	<b>11.07</b>	6.20	<b>0.55</b>
	Umspannwerk III	<i>Kabel</i>	<b>3.66</b>	1.92	<b>4.64</b>	2.76	<b>0.79</b>
	Umspannwerk IV	<i>Kabel</i>	<b>4.45</b>	3.24	<b>5.45</b>	3.08	<b>0.82</b>
<b>Wohngebiet</b>	Umspannwerk V	<i>Einspeisung</i>	<b>31.29</b>	10.54	<b>22.09</b>	9.68	<b>1.43</b>
		<i>Kabel</i>	<b>17.18</b>	6.30	<b>17.18</b>	6.69	<b>1.00</b>

Aus Tabelle 2 ist zu erkennen, dass die Erwartungswerte der Nullsystemströme um maximal 56% von den entsprechenden Werten der Gegensystemströme abweichen. Das bedeutet, dass das Verhältnis Null- zu Gegensystemstrom bei den untersuchten Abnehmern im Bereich:

$$0.44 \cdot I_2 \leq I_0 \leq 1.43 \cdot I_2 \quad (77)$$

oder vereinfacht



$$0.5 \cdot I_2 \leq I_0 \leq 1.5 \cdot I_2 \quad (78)$$

liegt. Damit ist das Stromverhältnis gemäß Gleichung (19), das für ideale Netzbedingungen (keine Unsymmetrie-Quellen im Mittelspannungsnetz sowie Blindleistungskompensation in drei oder zwei Phasen auf gleiche Werte des Verschiebungsfaktors  $\cos \varphi$ ) abgeleitet wurde, praktisch verifiziert.

Bild 8 zeigt beispielweise die Summenhäufigkeitsverteilungen der Null- und Gegensystemströme in einem Kabelabgang der Transformatorstation im Wohngebiet (letzte Zeile in Tabelle 2). Null- und Gegensystemstromkomponente stimmen nahezu überein.

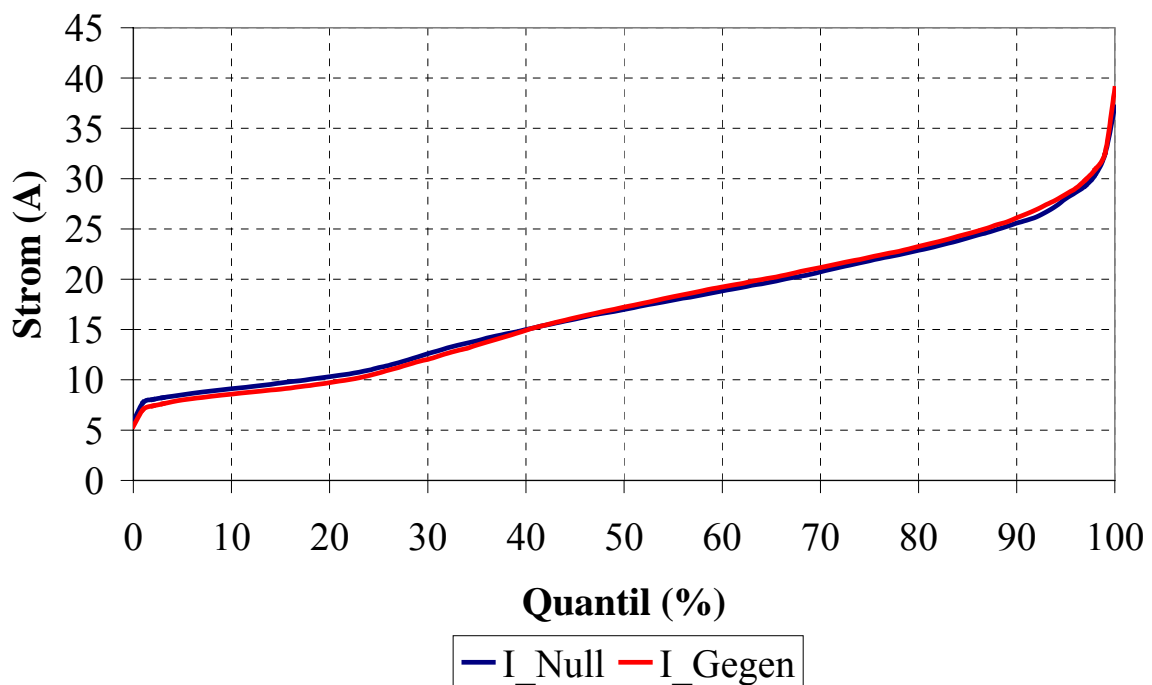


Bild 8: Summenhäufigkeiten der Null- und Gegensystemströme für ein Messbeispiel

Formel (78) kann auch für die näherungsweise Bewertung der Neutralleiterbelastung von MS/NS-Transformatoren auf der Grundlage der Stromverhältnisse im Mittelspannungsnetz verwendet werden. Bild 9 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen der 30-Min-Mittelwerte der Gegensystemstromkomponenten (10-kV-seitig ermittelt und auf die 0,4-kV-Seite umgerechnet) und der Nullsystemstromkomponenten (0,4-kV-seitig gemessen) für unterschiedliche Wochenzeiträume für den gleichen Abnehmer 0,4-kV-Einspeisung Fa. I (Tabelle 2). Aus Bild 9 ist zu entnehmen, dass das Verhältnis der 95%-Quantile des Nullsystemstromes zum Gegensystemstrom einen Wert von 0,76 hat.

Dieser Wert genügt der Formel (78). Es ist anzumerken, dass die Messungen auf der 10-kV-Transformatorseite mit dem relativ einfachen Messgerät erfolgten und für die Analyse vereinfachend die gemessenen Stromeffektivwerte benutzt wurden. Dabei wurde angenommen, dass die Stromeffektivwerte keine wesentlichen Unterschiede zu den Grundswingungsströmen aufweisen. Die Messungen auf der 0,4-kV-Seite erfolgten dagegen mit einem anderen Messgerät, das die einzelnen Harmonische erfassen kann. Für die Summenhäufigkeitsbildung wurden die Nullsystemstromkomponenten der Grundswingung verwendet.

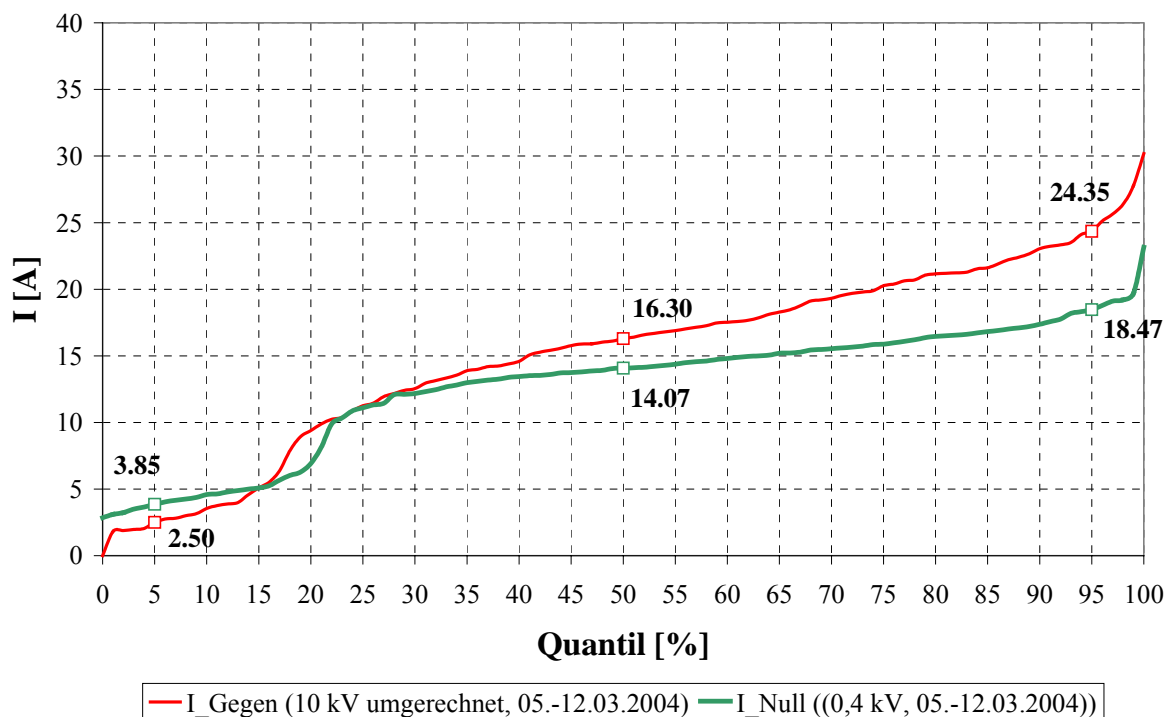


Bild 9: Summenhäufigkeiten des Nullsystemstromes (0,4-kV-Seite) und des Gegensystemstromes (10-kV-Seite) für einer Transformatorstation

Eine Einschätzung der Transformator-Neutralleiterbelastung anhand der MS-Stromwerte hat den Vorteil, dass die Messungen mit relativ einfachen 3-kanäligen Messgeräten durchgeführt werden können und das Messgerät in den Stromwandlerkreisen angeschlossen werden kann.

Damit kann die praktische Schlussfolgerung gezogen werden, dass Messungen zur Beurteilung der Neutralleiter-Stromverhältnisse und –belastung im MS-Bereich, d. h. auf der MS-Seite der Transformatoren durchgeführt werden können. Eine Einschätzung der

Neutralleiterstrombelastung ist anhand der Gegenstromkomponente nach Formel (78) bzw. (19) möglich.

Es genügt dabei, die Strombeträge zu messen. Die Bestimmung der Gegensystemstromkomponente erfolgt nach der aus der Literatur [13] bekannten Formel

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3} \cdot I_{L1} - \sqrt{4 \cdot I_{L2}^2 - \left( \frac{I_{L2}^2 - I_{L3}^2}{I_{L1}} + I_{L1} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{I_{L2}^2 - I_{L3}^2}{I_{L1}} \right)^2 \right]} \quad (79)$$

oder näherungsweise durch

$$I_2 = 0,62 \cdot (I_{Li}^{\max} - I_{Lj}^{\min}) \quad (80)$$

mit  $I_{Li}^{\max}$  und  $I_{Lj}^{\min}$  - Maximal- und Minimalwerte der Stromeffektivwerte in den Leitern L1...L3.

## 5 Vergleich der Mess- und Berechnungsergebnisse

Bild 10 zeigt die Summenhäufigkeiten der Grundswingungsströme im Neutralleiter, die aus den Messungen in einer Ortsnetztransformatorstation ( $S_{rT} = 250$  kVA) sowie aus entsprechenden Berechnungen nach Gleichung (31) ermittelt wurden.

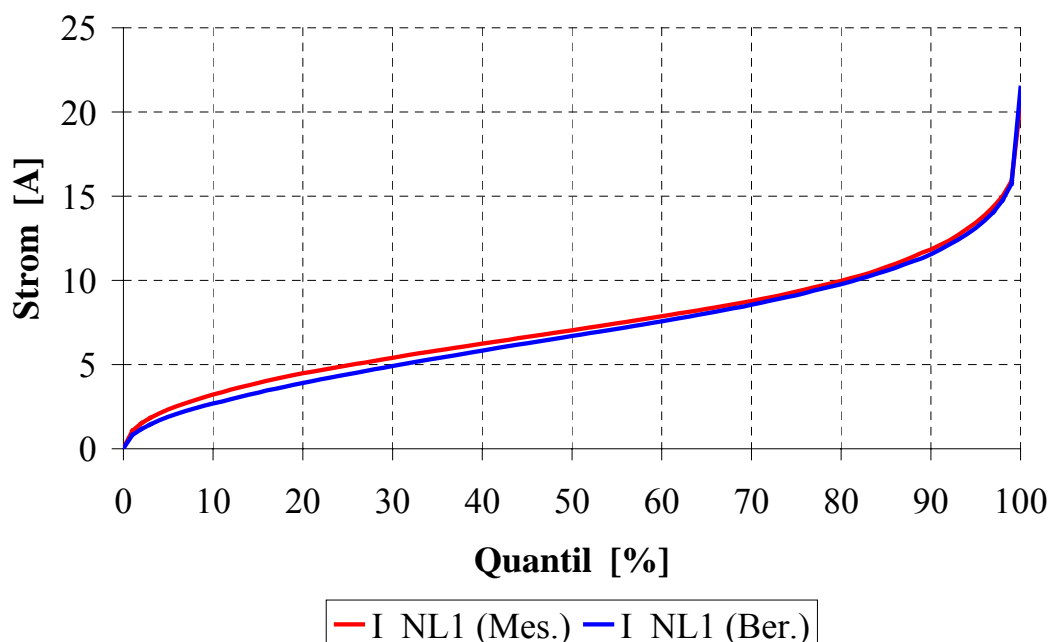


Bild 10: Summenhäufigkeiten der Grundswingungsneutralleiterströme (Ortsnetztransformatorstation,  $S_{rT} = 250$  kVA)

Es ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den Summenhäufigkeitswerten minimal sind.

Ein weiteres Beispiel zeigt Bild 11. In Bild 11 sind die Summenhäufigkeiten der gemessenen und der nach (67) berechneten Neutralleiterstromeffektivwerte für einen Abnehmer dargestellt, der von einer Ortsnetztransformatorstation ( $S_{rT} = 630 \text{ kVA}$ ) über ein 15 m langes Kabel  $3 \times 150 / (2 \times 150) \text{ mm}^2$  gespeist wird.

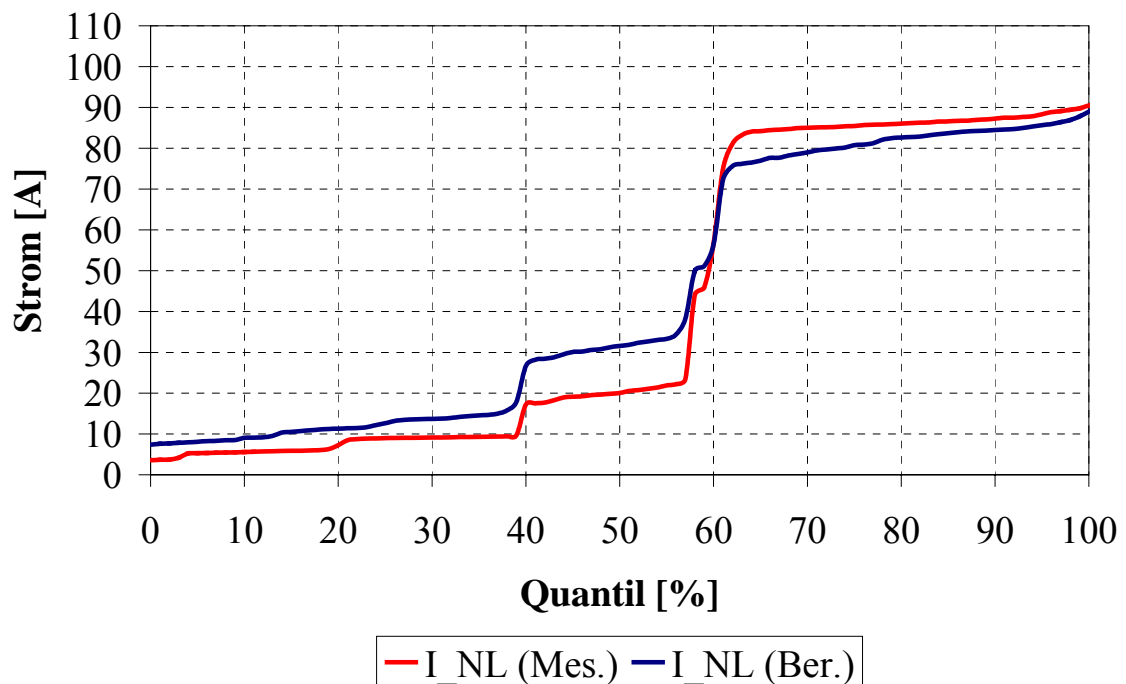


Bild 11: Summenhäufigkeiten der Neutralleiterstromeffektivwerte (0,4-kV-Kabel-Abgang, 15-m-Kabellänge,  $S_{rT} = 630 \text{ kVA}$ )

Es ist zu sehen, dass die beiden Summenhäufigkeitskurven in der Grafik nah zueinander liegen. Der Zahlenwert des 95%-Quantils der berechneten Summenhäufigkeitskurve beträgt 96,5% vom Zahlenwert des 95%-Quantils der aus den Messungen ermittelten Summenhäufigkeitsverteilung. Daraus kann geschlossen werden, dass die abgeleiteten Formel für die praktische Bewertung der Neutralleiterbelastung in Niederspannungsnetzen eingesetzt werden können.

## 6 Leistungsflüsse der symmetrischen Grundschwingungskomponenten

Wie erwähnt, beziehen sich die Betrachtungen der vorherigen Abschnitte auf idealisierte Netzverhältnisse: keine Unsymmetrie-Quellen im Mittelspannungsnetz sowie Blindleistungskompensation in drei oder zwei Phasen auf gleiche Werte  $\cos \varphi$ . In einem

realen Netz werden im allgemeinen mehrere NS-Netze mit unsymmetrisch aufgeteilten einphasigen Belastungen an das MS-Verteilnetz angeschlossen. Dadurch resultiert Spannungsunsymmetrie an den NS-Netzknotenpunkten als Ergebnis von Wechselwirkungen der Beeinflussungen mehrerer NS-Unsymmetriequellen.

Ein geeignetes mathematisches Mittel zur Charakterisierung derartiger Wechselwirkungen stellt die Analyse der anomalen Leistungsflüsse in einem elektrischen Netz mit nichtlinearen und/oder unsymmetrischen Abnehmern [11, 12] dar. Entsprechend der theoretischen Betrachtungen existieren in einem solchen Netz zeitgleich **normale** Leistungsflüsse (Mitsystem der Grundschiwingung), die von der Energiequelle zum nichtlinearen oder unsymmetrischen Abnehmer gerichtet sind, und **anomale** Leistungsflüsse, die entgegengesetzt gerichtet sind (siehe Bild 12).

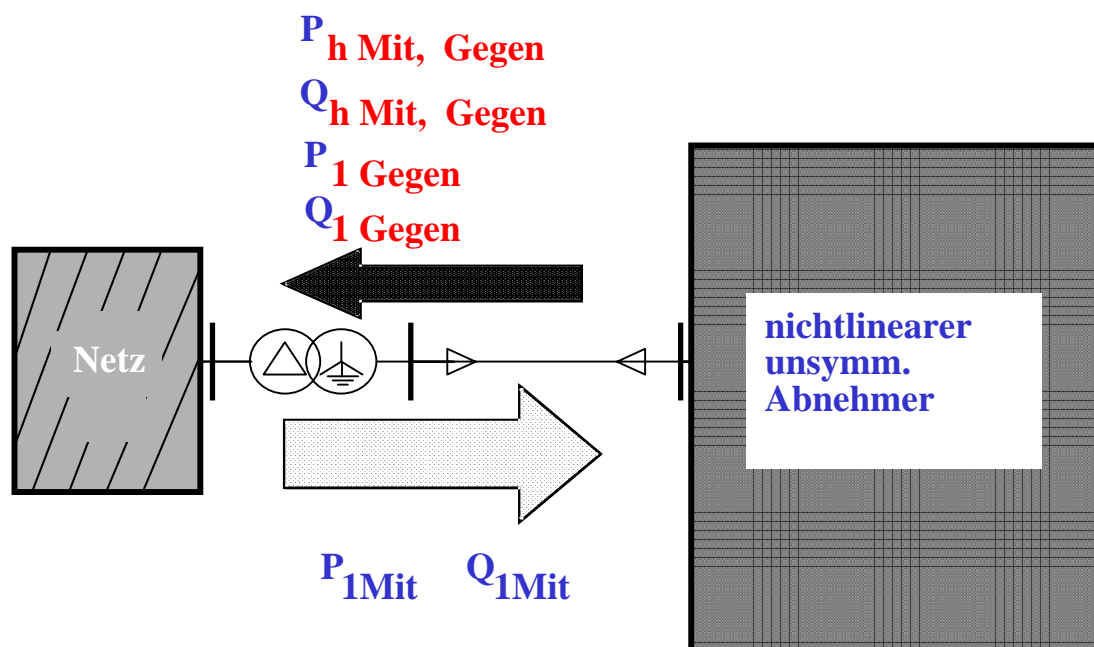


Bild 12: Leistungsflüsse in einem elektrischen Netz mit einem nichtlinearen oder unsymmetrischen Abnehmer

Es ist anzumerken, dass die anomalen Leistungsflüsse des Gegensystems von nichtlinearen und von unsymmetrischen NS-Abnehmern ungehindert in das MS-Netz dringen können. Für die Ausbreitung der anomalen Leistungsflüsse sowohl des Mit- als auch Gegensystems spielt die Sternpunkt-Behandlung im elektrischen Netz keine Rolle. Anders ist dies bei den anomalen Nullsystem-Leistungsflüssen, die ebenfalls durch nichtlineare Eigenschaften der Abnehmer-Belastungen sowie durch die Abnehmer-Unsymmetrie in Vierleiter-Drehstromnetzen entstehen. Weil die Nullsystemströme

grundsätzlich nicht in MS-Dreileiter-Drehstromnetze mit isolierten Sternpunkten fließen können, breiten sich die Nullsystemleistungsflüsse nur innerhalb des jeweiligen NS-Netzes. Das verdeutlicht Bild 13.

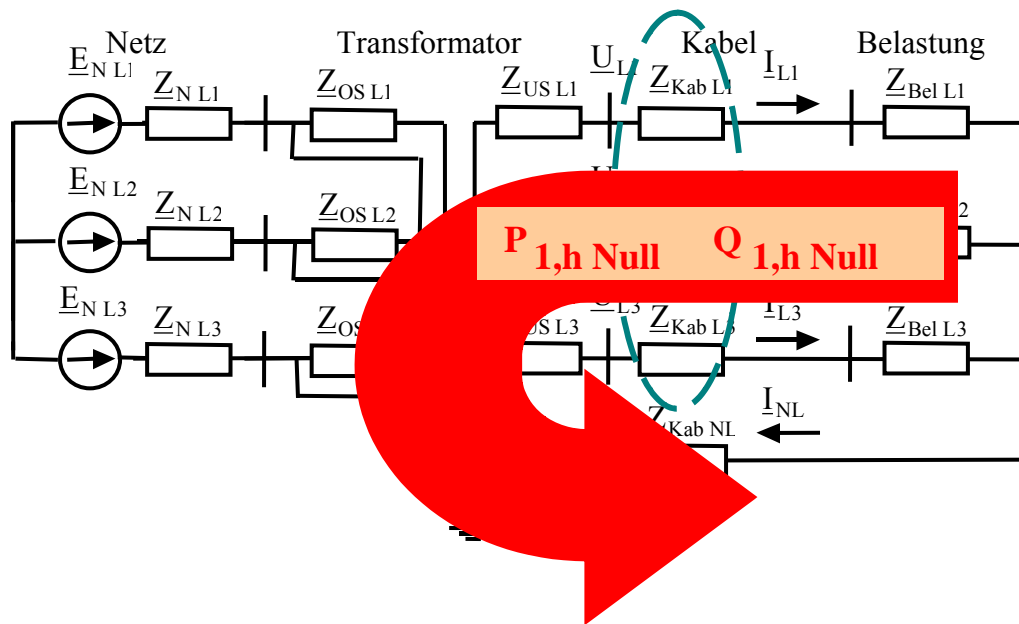


Bild 13: Ausbreitung der Nullsystemleistungsflüsse in einem elektrischen Netz mit einem nichtlinearen oder unsymmetrischen Abnehmer

Diese Verhältnisse werden auch durch Bild 14 bestätigt. In Bild 14 sind die auf der Grundlage von Messungen ermittelten Grundschiwungsleistungsflüsse in der 0,4-kV-Einspeisung einer Ortsnetztransformatorstation ( $S_{rT} = 250 \text{ kVA}$ ) dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Belastungen der betrachteten 0,4-kV-Einspeisung die Quellen der Nullsystemgrundschiwungsspannungen sind. Das ist am negativen Vorzeichen der Wirkleistungsflüsse des Nullsystems zu erkennen.

Die Wirkleistungsflüsse des Gegensystems können dagegen durch das Mittelspannungsnetz fließen. Dadurch können die Vorzeichen der Gegensystem-Wirkleistungsflüsse sowohl positiv als auch negativ sein. In Bild 14 ist deutlich zu erkennen, dass die gleichen 0,4-kV-Abnehmer sowohl als Quellen als auch als Senken der Wirkleistungsflüsse des Gegensystems fungieren können. Es ist allerdings festzustellen, dass die hier betrachteten Abnehmer überwiegend Gegensystem-Wirkleistungssenken sind. Dies weist darauf hin, dass die Spannungsunsymmetrie im betrachteten 0,4-kV-Netz im wesentlichen durch unsymmetrische Verhältnisse im Mittelspannungsnetz zu Stande kommt.

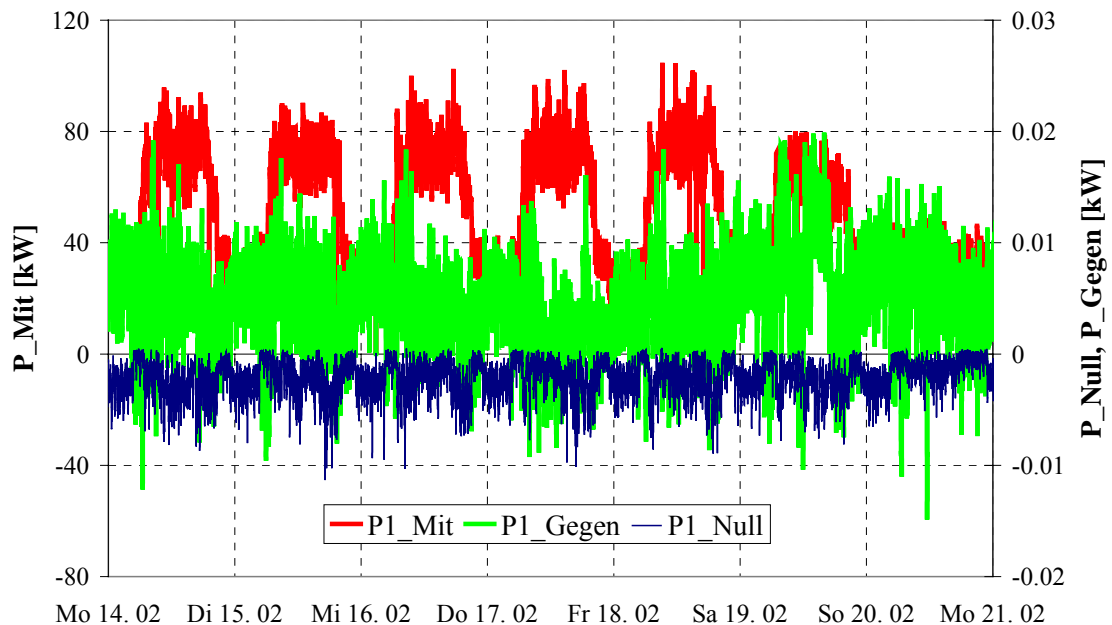


Bild 14: Ausbreitung der Nullsystemleistungsflüsse in einem elektrischen Netz mit einem nichtlinearen oder unsymmetrischen Abnehmer (1-Min-Werte)

Generell kann geschlussfolgert werden, dass die in den theoretischen Betrachtungen und Berechnungen vorausgesetzten idealen Netzbedingungen in realen Niederspannungsnetzen nicht immer erfüllt sind. Allerdings es ist festzustellen, dass die für ideale Netzbedingungen abgeleiteten Formeln Ergebnisse sowohl für das Verhältnis der Null- und der Gegensystemstromkomponenten als auch in der Bewertung der Neutralleiterbelastung in der richtigen Größenordnung auch für reale Niederspannungsnetze ermöglichen und damit zur praktischen Verwendung empfohlen werden können.

## 7 Zusammenfassung

Im Beitrag wurde die praktische Vorgehensweise für die Ermittlung der zu erwartenden Neutralleiterströme beschrieben. Die Berechnungen sind so ausgerichtet, dass sie auf der Grundlage der Kenngrößen der Elektroenergiequalität, der Parameter der Netzbetriebsmittel und der Charakteristika des Betriebszustandes im Niederspannungsnetz ausgeführt werden können.

Ausgehend von der analytischen Beschreibung der typischen NS-Netzstruktur wurden

vereinfachte Berechnungsgleichungen für die Neutralleiterströme abgeleitet.

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass trotz Einhaltung der für NS-Netze in den EEQ-Normen festgelegten Grenzwerte zur Spannungsunsymmetrie und zu den Oberschwingungsspannungen grundsätzlich Überlastungen der Neutralleiter durch die Grundschwingungs- und Oberschwingungsnullsystemströme möglich sind.

Aus den Untersuchungen geht weiter hervor, dass der Neutralleiterstrom praktisch anhand der gemessenen tatsächlichen EEQ-Kenngrößen ermittelt werden kann.

Umfangreiche Computersimulationen und praktischen Messungen, die in einer Reihe von NS-Netzen durchgeführt wurden, haben die Korrektheit und Anwendbarkeit der entwickelten Methodik bestätigt.

#### Literatur:

- [1] Shared-Neutral Current in Branch Circuits Serving Office Equipment. EPRI PEAC Brief No. 33. December 1996
- [2] Three Phase Power Source Overloading Caused by Small Computers and Electronic Office Equipment . ITI (CBEMA) Information Letter. 06.01.1987
- [3] VDE 0839 Teil 2-4. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 2-4: Umgebungsbedingungen. Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen (IEC 61000-2-4:2002); Deutsche Fassung EN 61000-2-4:2002. Berlin, VDE-Verlag, Mai 2003
- [4] DIN 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsnetzen. Deutsche Fassung EN 50160: 1999, Beuth Verlag, Berlin, März 2000
- [5] VDE 0102. Kurzschlüsse in Drehstromnetzen. Teil 0: Berechnung der Ströme (IEC 60909-0:2001). Deutsche Fassung EN 60909-0:2001. Berlin, VDE-Verlag, Juli 2002
- [6] TU Ilmenau. Belastung des Neutralleiters in Niederspannungsnetzen. Technischer Bericht vom 30.06.2004
- [7] Wakileh G. Power Systems Harmonics. Fundamentals, Analysis and Filter Design. Springer Verlag 2001
- [8] ABB Schaltanlagen. 10. Aufl. Cornelsen Verlag Berlin, 1999
- [9] Pistora G. Berechnung des einpoligen Kurzschlussstroms. VDE-Verlag, Berlin – Offenbach, 1999
- [10] Кучумов Л., Харлов Н., Картасиди Н., Пахомов А., Кузнецов А. Использование метода гармонического баланса для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения, Электричество, No 12, 1999, S. 10-20  
Kuchumov L., Charlov N., Kartasidi N., Pachomov A., Kuznetsov A. Anwendung des Verfahrens der harmonischen Bilanz zur Berechnung der nichtsinusförmigen und unsymmetrischen Betriebszustände in Elektroenergieversorgungssystemen. Elektritschestvo (Elektrizität), N 12, 1999, S. 10-20 (Russ.)
- [11] Кучумов Л.А., Спиридонова Л.В. Потoki мощности и энергии в электрических сетях с нелинейными потребителями и их использование при учете электроэнергии и оценке добавочных потерь. – 28. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium TH Ilmenau, Vortragsreihe A1, Ilmenau, DDR, 1983, S. 155-158
- [12] Kuchumov L., Novitskiy A., Selenskaya M. Study of Anomalous Power Flows in Electrical Power Systems. - Proceedings of the Conference Electric Power Quality and Supply Reliability 99, Sagadi, Estonia, 1999, pp. 25-30
- [13] ГОСТ 13109-97: Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. 2002.

#### Autoren:

Dr.-Ing. Alexander Novitskiy, PD Dr.-Ing. habil. Holger Schau  
Dipl.-Ing. Tobias Nachtwey  
TU Ilmenau, P.O.B. 10 05 65  
98693, Ilmenau  
Tel. : +49 (3677) 691490/89  
Fax: +49 (3677) 691496  
E-mail: [Nov@E-Technik.TU-Ilmenau.de](mailto:Nov@E-Technik.TU-Ilmenau.de),  
[Holger.Schau@TU-Ilmenau.de](mailto:Holger.Schau@TU-Ilmenau.de)

Dipl.-Ing. Ulrich Klemmer  
Stadtwerke Suhl/Zella-Mehlis  
Fröhliche-Mann-Str. 2  
98528. Suhl  
+49 (3681) 495 1722  
+49 (3681) 495 1749  
[ulrich.klemmer@swsz.de](mailto:ulrich.klemmer@swsz.de)